

## Almacenamiento holográfico de páginas de datos: Comparación de la modulación binaria en intensidad con la modulación híbrida ternaria

### Holographic data storage: Comparison of binary intensity modulation and hybrid ternary modulation

Elena Fernández<sup>(\*,1,S)</sup>, Andrés Márquez<sup>(2,S)</sup>, Rosa Fuentes<sup>(1,S)</sup>, Celia García<sup>(1)</sup>,  
Sergi Gallego<sup>(2,S)</sup>, e Inmaculada Pascual<sup>(1,S)</sup>

1. Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, Universidad de Alicante, E-03080, Alicante, España.
2. Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, E-03080 Alicante, España.

(\*) Email: Elena.Fernandez@ua.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 30/09/2009. Revisado / Revised: 12/02/2010. Aceptado / Accepted: 15/02/2010

#### RESUMEN:

En este trabajo se muestra la optimización de una pantalla de cristal líquido nemático (TN-LCD) para su aplicación al almacenamiento holográfico de la información. En concreto el LCD se ha optimizado para modular el haz láser utilizado en el registro holográfico con dos tipos de modulaciones: la modulación binaria en intensidad y la modulación híbrida ternaria de amplitud y fase (HTM). Se han almacenado también holográficamente páginas de datos utilizando estos dos tipos de modulación y se ha calculado el Bit Error Rate (BER) de las imágenes obtenidas. Finalmente, en base a los resultados, se han comparado ambas modulaciones para ver cual es la modulación más apropiada para el almacenamiento holográfico.

**Palabras clave:** Optimización LCD, Almacenamiento Holográfico de Datos.

#### ABSTRACT:

This paper shows the optimization of a nematic liquid crystal display (TN-LCD) for application to holographic data storage. Specifically, the LCD is optimized for record the holograms with two types of modulations: binary intensity modulation and hybrid ternary modulation (HTM). Moreover, data pages have also stored holographically using these two modulations and the Bit Error Rate (BER) of the images has been calculated. Finally, based on the results, both modulations are compared to see which is most appropriate modulation to be used for holographic data storage.

**Key words:** LCD Optimization, Holographic Data Storage.

#### REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] R. R. Mcleod, A. J. Daiber, M. E. McDonald, T. L. Robertson, T. Slagle, S. L. Sochava, L. Hesselink, "Microholographic multilayer optical disk data storage", *Appl. Opt.* **44**, 3197-3207 (2005).
- [2] E. Fernández, M. Ortuño, S. Gallego, A. Márquez, C. García, A. Beléndez, I. Pascual, "Multiplexed holographic data page storage on a PVA/acrylamide photopolymer memory", *Appl. Opt.* **47**, 4448-4456 (2008).
- [3] A. Márquez, S. Gallego, D. Mendez, M. L. Alvarez, E. Fernández, M. Ortuño, C. Neipp, A. Beléndez, I. Pascual, "Accurate control of a liquid-crystal display to produce a homogenized Fourier transform for holographic memories", *Opt. Lett.* **32**, 2511-2513 (2007).
- [4] L. Domjan, P. Koppa, G. Szarvas, J. Remenyi, "Ternary phase-amplitude modulation with twisted nematic liquid crystal displays for Fourier-plane light homogenization in holographic data storage", *Optik* **113**, 382-390 (2002).

- [5] E. Fernández, A. Márquez, M. Ortuño, R. Fuentes, C. García, I. Pascual, "Optimization of twisted-nematic liquid crystal displays for holographic data storage", *Opt. Pura Apl.* **42**, 125-132 (2009).
- [6] A. Márquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. A. Davis, J. Campos, M. J. Yzuel, "Quantitative prediction of the modulation behavior of twisted nematic liquid crystal displays based on a simple physical model", *Opt. Eng.* **40**, 2558-2564 (2001).
- [7] A. Márquez, J. Campos, M. J. Yzuel, I. Moreno, J. A. Davis, C. Iemmi, "Characterization of edge effects in twisted nematic liquid crystal displays", *Opt. Eng.* **39**, 3301-3307 (2000).
- [8] E. Fernández, M. Ortuño, S. Gallego, A. Márquez, C. García, R. Fuentes, A. Beléndez, I. Pascual, "Optimization of a holographic memory setup using an LCD and a PVAbased photopolymer", *Optik* **121**, 151-158 (2009).
- [9] H. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox, *Holographic Data Storage*, Springer-Verlag, New York (2000).

## 1. Introducción

En la sociedad actual tienen gran importancia las nuevas tecnologías como los ordenadores, los reproductores de música y video o las memorias de almacenamiento de información. Todos los usuarios de estas tecnologías almacenan cantidades cada vez más grandes de datos digitales. La demanda de más capacidad, más densidad de datos y mayor velocidad de lectura en los dispositivos de almacenamiento de información se está incrementando considerablemente. Las tecnologías de almacenamiento óptico convencionales, como los CD-ROM y los DVD, son dispositivos en los cuales la información se registra en la superficie del disco mediante técnicas bidimensionales. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento en estos dispositivos ha llegado a su límite, por lo que en estos últimos años se está centrando la atención en el desarrollo de técnicas de almacenamiento holográfico, con las cuales la información no sólo se pueda almacenar en la superficie del material, sino en todo su volumen [1].

En este trabajo nos vamos a centrar en el almacenamiento holográfico del mayor número de páginas de datos posible mediante el multiplexado de hologramas en un material basado en PVA/Acrilamida y utilizando una pantalla de cristal líquido para modular el haz objeto. Además, se van a utilizar y comparar dos métodos para modular este haz objeto: la modulación binaria en intensidad [2] y la modulación híbrida ternaria de amplitud y fase (HTM) [3,4].

El material estará formado por acrilamida (AA), el poli(alcohol vinílico) (PVA), la trietanolamina (TEA) y la eosina amarillenta (EA), para formar capas con un espesor de 80  $\mu\text{m}$  [2].

Para el almacenamiento holográfico de datos, los LCD se utilizan como moduladores espaciales de luz, a los cuales se les envían las páginas de datos, almacenándose en el material la Transformada de Fourier (TF) mediante técnicas holográficas. Por lo general, se suele utilizar una modulación binaria en intensidad para modular el haz objeto. Sin embargo, este tipo de modulación produce en la TF un orden cero con una intensidad varios órdenes de magnitud más elevada que el resto de frecuencias. Este hecho hace que se sature el rango dinámico del material, lo que limita el almacenamiento de una mayor cantidad de información. Para intentar homogeneizar la TF, existen otros tipos de modulaciones que reducen la intensidad de este orden cero, como por ejemplo, el HTM [5]. En este trabajo se van a almacenar las páginas de datos utilizando estos dos tipos de modulaciones y se van a comparar los resultados obtenidos para ver que modulación sería la más adecuada para el almacenamiento holográfico de datos. Para poder comparar los resultados, de cada uno de los hologramas almacenados se va a calcular el BER de sus imágenes correspondientes, definiéndose como BER la probabilidad de encontrar bits erróneos en la imagen. Así, las imágenes con menor BER serán las de mayor calidad de imagen.

## 2. Optimización de la LCD

Como se ha mencionado en la introducción, para almacenar las páginas de datos se van a utilizar dos tipos de modulaciones diferentes: la modulación binaria en intensidad y el HTM. Para ello, en primer lugar es necesario calibrar y optimizar el LCD para conseguir estos dos tipos de modulaciones. Son numerosos los trabajos que detallan la calibración del LCD [6,7], por lo que resulta más interesante centrarnos en la

optimización que permite conseguir estas dos modulaciones. La optimización consiste en encontrar qué valores de niveles de gris enviados al LCD y qué ángulos de los polarizadores que se colocan antes y después del LCD hacen que el conjunto module el haz objeto de la forma deseada, partiendo de las birrefringencias  $\beta$  y  $\delta$  calibradas en función del voltaje aplicado al LCD.

Para la modulación binaria en intensidad es necesario encontrar dos estados que cumplan la condición de contraste máximo, es decir, un estado con máxima intensidad (bits blancos de la página de datos) y otro con mínima intensidad (bits negros). Después de realizar el ajuste, en la Fig. 1 se han representado los valores de la transmitancia y la fase que se obtienen en función del nivel de gris. Estos valores se han obtenido para una orientación de los ejes de transmisión de los polarizadores con los siguientes ángulos:  $\varphi_1=116^\circ$  y  $\varphi_2=111^\circ$  con respecto sistema de referencia laboratorio que lo marcan los ejes directores de entrada y salida del LCD, donde  $\varphi_1$  es el polarizador que se coloca delante del LCD y  $\varphi_2$  es el del polarizador que se coloca detrás del LCD [6]. Así se ha encontrado que el nivel de gris que proporciona la máxima transmitancia es 250, y el que proporciona la menor transmitancia es el nivel de gris 0. Con estos dos estados se consigue un contraste máximo del 98%, definiendo el contraste como

$$M = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}).$$

En el caso del HTM, es necesario encontrar tres estados, dos que se corresponden con los bits blancos y que tienen una diferencia de fase de  $\pi$  rad y transmitancia máxima, y un tercer estado que se corresponde con los bits negros y que tiene transmisión mínima. Después de realizar el proceso de optimización [6], la transmitancia y fase obtenidas se han representado en la Fig. 2, cuyos valores se han conseguido colocando en los polarizadores los ángulos  $\varphi_1=178^\circ$  y  $\varphi_2=93^\circ$ . En esta configuración, los dos estados de máxima transmitancia y desfase de  $180^\circ$  se obtendrían con los niveles de gris 60 y 160. Y el estado de mínima transmitancia se obtendría con el nivel de gris 140. Con estos niveles de gris, el contraste máximo que se obtiene es de 82%; y la diferencia de fase entre los dos blancos es  $195^\circ$ .

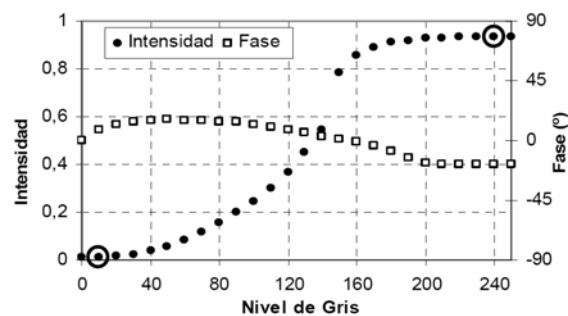


Fig. 1. Transmitancia y fase obtenidas en la optimización de la LCD para conseguir una modulación binaria en intensidad.

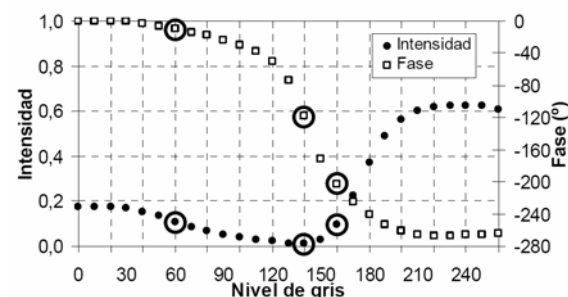


Fig. 2. Transmitancia y fase obtenidas en la optimización de la LCD para conseguir el HTM.

### 3. Comparación de la modulación binaria en intensidad y el HTM

En este apartado se van a multiplexar páginas de datos de cuatro tamaños de bits diferentes ( $300 \times 300$ ,  $400 \times 400$ ,  $500 \times 500$  y  $800 \times 600$ ) en una placa de fotopolímero de espesor  $80 \mu\text{m}$ , con una separación angular de  $3^\circ$  y con  $R=100$ . Una vez almacenados se van a reconstruir con una intensidad  $I_R=0.3\text{mW/cm}^2$  capturando la imagen obtenida con una cámara CCD. En trabajos previos se obtuvo que éstos eran los parámetros más adecuados para obtener la mejor calidad de imagen [8]. Para almacenar en el fotopolímero tantos hologramas como sea posible se incrementa la exposición gradualmente conforme se van registrando las páginas de datos y así se consigue que los últimos hologramas lleguen a tener el mismo rendimiento en difracción que los primeros y así conseguir que el BER de todas las imágenes sea el mismo. Una vez almacenados todos los hologramas se reconstruyen al final del proceso de registro con el haz de referencia y se capturan las imágenes difractadas con una CCD. A continuación se calcula el BER de estas imágenes [2,8,9]. Este proceso de almacenamiento se va a seguir tanto para la modulación binaria en intensidad como para el HTM.

En primer lugar, se van a almacenar las páginas de datos utilizando la modulación binaria en intensidad. En la Fig. 3 se representa con triángulos violetas la exposición con la que se van a almacenar los cuatro objetos utilizando esta modulación.

El primer objeto que se va a almacenar es el de 300×300 bits, cuyo BER se ha representado en la Fig. 3 con círculos negros. Como se puede observar, se han llegado a almacenar hasta 15 hologramas. Los nueve primeros hologramas tienen todos un BER inferior a 0.1; los tres siguientes tienen valores del BER comprendidos entre 0.1 y 0.2. Y ya los dos últimos tienen valores del BER superiores a 0.2. En este trabajo se va a considerar que valores del BER inferiores a 0.2 son los que proporcionan imágenes de calidad.

El siguiente objeto almacenado es el de 400×400 bits, cuyo BER se ha representado en la Fig. 3 con círculos vacíos azules llegándose a almacenar hasta 12 hologramas con un BER inferior a 0.2; los primeros 8 hologramas con valores del BER muy cercanos a cero.

El siguiente objeto almacenado es el de 500×500 bits que está representado con cuadrados rojos y se han llegado a almacenar hasta 15 hologramas con un BER inferior a 0.2.

Por último se ha multiplexado el objeto de 800×600 bits, cuyos valores del BER se han representado con cuadrados vacíos verdes y, como se observa, se han almacenado 16 hologramas con un BER inferior a 0.2.

Las oscilaciones que aparecen en las curvas del BER de la Fig. 3 son debidas a la no linealidad del material cuando el monómero y el colorante prácticamente ya se han consumido (hologramas almacenados al final). Por este motivo, el holograma no se llega a almacenar con la suficiente calidad necesaria para poder distinguir unos bits de otros.

En la Fig. 4 se han representado las mejores imágenes obtenidas con el menor BER para cada uno de los objetos almacenados con la modulación binaria en intensidad. La imagen (a) se corresponde con el objeto de 300×300 bits y tiene un valor del BER de 0.01. Las imágenes (b) y (c) se corresponden con los objetos de 400×400 bits y 500×500 bits y tienen un valor del BER de 0.02. Y la imagen (d) se corresponde con el objeto de 800×600 bits y tiene un valor del BER de 0.04.

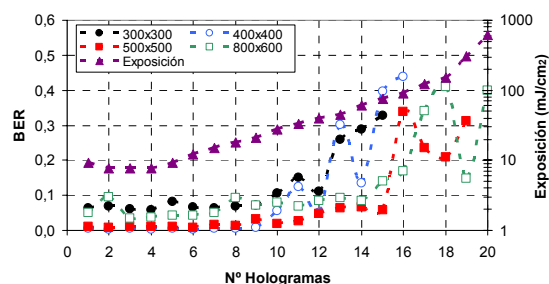


Fig. 3. Para un espesor de 80  $\mu\text{m}$ , BER de los objetos de 300×300 bits (círculos negros), 400×400 bits (círculos vacíos azules), 500×500 bits (cuadrados rojos), 800×600 bits (cuadrados vacíos verdes) y exposición (triángulos vacíos violetas).

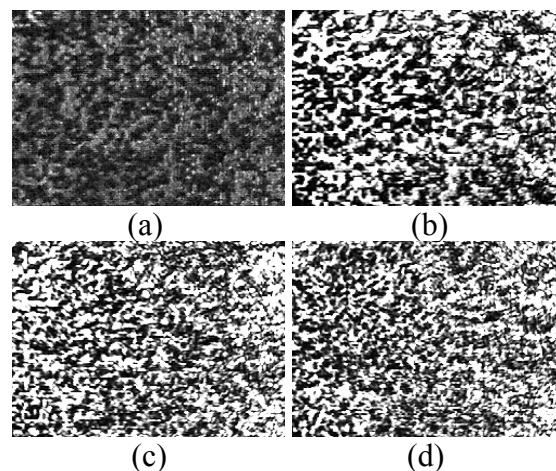


Fig. 4: Mejores imágenes obtenidas para la modulación binaria en intensidad para correspondientes a los objetos almacenados con (a) 300×300 bits, (b) 400×400 bits, (c) 500×500 bits y (d) 800×600 bits.

En segundo lugar, se van a almacenar los cuatro objetos utilizando el HTM para modular el haz objeto. La exposición utilizada para almacenarlos se representa en la Fig. 5 con triángulos violetas.

Con círculos negros se representa el BER de los hologramas almacenados para el objeto de 300×300 bits. Como se observa, se han llegado a almacenar 22 hologramas con un BER inferior a 0.2. Además, los 7 primeros hologramas tienen un BER muy cercano a 0.

Para el objeto de 400×400 bits, se han llegado a almacenar 25 hologramas con un BER menor o igual a 0.2.

A continuación se va a almacenar el objeto con 500×500 bits. En este caso también se han llegado a almacenar 25 hologramas con un BER que no supera el valor de 0.15.

Por último se va a multiplexar el objeto que tiene  $800 \times 600$  bits. Se han almacenado 22 hologramas; los 7 primeros con valores del BER cercanos a cero, y el resto de hologramas con valores del BER comprendidos entre 0.1 y 0.2.

En la Fig. 6 se han representado las mejores obtenidas con el HTM. En este caso, las imágenes (a), (b), (c) y (d) tienen valores del BER de 0.01, 0.03, 0.02 y 0.03 respectivamente.

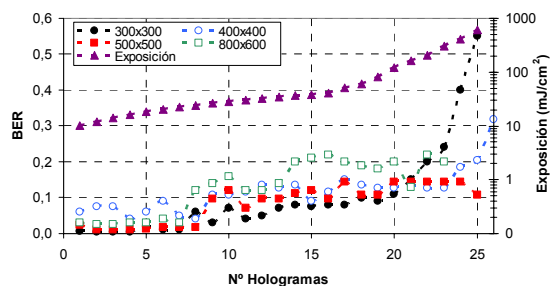


Fig. 5. Para un espesor de  $80 \mu\text{m}$ , BER de los objetos de  $300 \times 300$  bits (círculos negros),  $400 \times 400$  bits (círculos vacíos azules),  $500 \times 500$  bits (cuadrados rojos),  $800 \times 600$  bits (cuadrados vacíos verdes) y exposición (triángulos violetas).

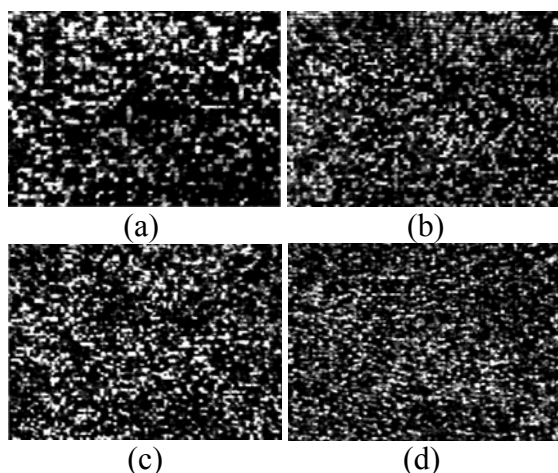


Fig. 6: Mejores imágenes obtenidas para la modulación binaria en intensidad para correspondientes a los objetos almacenados con (a)  $300 \times 300$  bits, (b)  $400 \times 400$  bits, (c)  $500 \times 500$  bits y (d)  $800 \times 600$  bits.

En la Fig. 3, donde los hologramas se han almacenado con una modulación binaria en intensidad, se observa que se han obtenido entre 12 y 16 hologramas (objetos de  $300 \times 300$  y  $800 \times 600$  bits) con un valor del BER inferior a 0.2. Pero no sólo eso, sino que los valores del BER son muy cercanos a cero para los objetos de  $400 \times 400$  y  $500 \times 500$  bits.

Si se observa ahora la Fig. 5, en la que los objetos se han almacenado con el HTM, se destaca que se han llegado a almacenar unos 25 hologramas con el BER inferior a 0.2. Es decir, que se han almacenado 10 hologramas más que con la modulación binaria en intensidad. Si nos fijamos en el BER, los hologramas del 1 al 8 tienen todos unos valores de BER muy por debajo de 0.1, y a partir del holograma 10 los valores del BER se encuentran alrededor de 0.1. El objeto de  $800 \times 600$  es el que tiene valores del BER cercanos a 0.2 para los hologramas del 15 al 25.

Por tanto, para este espesor de  $80 \mu\text{m}$ , la modulación con la que se consigue almacenar un mayor número de hologramas con buena calidad de imagen (valores del BER pequeños) es el HTM ya que se han conseguido almacenar más hologramas con valores del BER inferiores a 0.2.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se han multiplexado cuatro páginas de datos con diferentes tamaños de píxel en capas de fotopolímero de  $80 \mu\text{m}$  de PVA. Se utilizaron dos configuraciones diferentes para modular el haz objeto con un LCD: la modulación binaria en intensidad, que produce un orden cero varios órdenes de magnitud superiores al resto de frecuencias y que pueden saturar el rango dinámico del material, y el HTM, que se utiliza con el fin de reducir la frecuencia cero de la FT de las páginas de datos. Al reducir este orden cero se han conseguido almacenar un mayor número de hologramas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el “Ministerio de Ciencia e Innovación” bajo los proyectos FIS2008-05856-C02-01 y FIS2008-05856-C02-02 y por la “Generalitat Valenciana” bajo los proyectos ACOMP/2009/160 y ACOMP/ 2009/150.